

В. В. ШЛИКОВ

3D-МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО ОБМІНУ В МІОКАРДІ ТА КОРОНАРНИХ СУДИНАХ СЕРЦЯ

Запропоновано математичну 3D-модель теплового обміну в міокарді та коронарних судинах серця, що враховує теплопровідність і вільну конвекцію тепла в шарі міокарда для двох біофізичних станів тканин шлуночків серця – з нормальною щільністю розподілу коронарних судин у міокарді, а також за наявності зон ішемії у міокарді, які збіднені коронарними судинами. Таким чином, моделювання теплових процесів у міокарді підтверджує клінічні прояви хвороби серця, які вказують на невідповідність коронарного кровотоку метаболічним потребам серцевого м'яза. Отримані для теплової моделі температурні залежності дозволяють оцінити ступінь коронарної обструкції й ступінь звуження коронарних артерій у шлуночках серця, що є величиною пропорційною до змін температури.

Ключові слова: 3D-модель, міокард, розподіл температури, MSC Sinda.

Предложена математическая 3D-модель теплового обмена в миокарде и коронарных сосудах сердца, которая учитывает теплопроводность и свободную конвекцию тепла в слое миокарда для двух биофизических состояний тканей желудочков сердца – с нормальной плотностью распределения коронарных сосудов в миокарде, а также при наличии зон ишемии в миокарде, которые обеднены коронарными сосудами. Таким образом, моделирование тепловых процессов в миокарде подтверждает клинические проявления болезни сердца, которые указывают на несоответствие коронарного кровотока метаболическим потребностям сердечной мышцы. Полученные для тепловой модели температурные зависимости позволяют оценить степень коронарной обструкции и степень сужения коронарных артерий в желудочках сердца, является величиной пропорциональной к изменениям температуры.

Ключевые слова: 3D-модель, миокард, распределение температуры, MSC Sinda.

A mathematical 3D model of heat exchange in the myocardium and coronary vessels of the heart is proposed, which takes into account the thermal conductivity and free convection of heat in the myocardium layer for two biophysical states of the ventricular tissues of the heart – with a normal density of coronary artery distribution in the myocardium, and also in the presence of ischemic zones in the myocardium impoverished coronary vessels. Thus, modeling of thermal processes in the myocardium confirms clinical manifestations of heart disease, which indicate a discrepancy between coronary blood flow and metabolic needs of the heart muscle. The temperature dependences obtained for the thermal model make it possible to assess the degree of coronary obstruction and the degree of narrowing of the coronary arteries in the ventricles of the heart, being proportional to changes in temperature.

Keywords: 3D model, myocardium, temperature distribution, MSC Sinda.

Вступ. Тепловий режим організму контролюється в організмі різними відділами нервової системи, головним чином вегетативними. На сучасному етапі передбачається існування цілого ряду нервових центрів, в тій чи іншій мірі відповідальних за підтримання теплового балансу організму [1]. Вони розташовуються на рівні гіпоталамічних, таламічних, стріарних, коркових і спінальних ядер і в нормі працюють злагоджено. З балансу кількості тепла, що передається через шкірний покрив в одиницю часу і кількості тепла, вироблюваного усередині організму, можна оцінити величину часу прогріву тканини тіла τ до температури T_0 °C [2]:

$$\tau = \frac{c\rho l^2}{\lambda}, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність шкірного покриву; ρ – густина шкірного покриву; l – товщина шкіри, включаючи жировий прошарок; λ – теплопровідність.

При аналізі балансу кількості тепла звертають особливу увагу на виявлення зон гіпер- і гіпотермії і порушення структури судинного малюнку, оцінюють протяжність ділянки гіпер- або гіпотермії (обмежений, протяжний, дифузний), його локалізацію, розміри, форму, контури. В умовах штучного кровообігу на термограмах проявляються ефекти нерівномірного розподілу температури в тканинах організму людини під час керованого охолодження і зігрівання [3]. При запальних процесах визначається зона гіпертермії, що відповідає області інфільтрації, що має неоднорідну структуру, при цьому відзначається різниця темпера-

тур з навколишніми тканинами 0,7–1°C при хронічному запаленні, 1–1,5°C при гострому і понад 1,5–2°C – при деструктивному процесі [4, 5]. В експериментальних та хірургічних ситуаціях, пов'язаних з серцем, дані термографії можуть допомогти визначити ступінь ішемічного пошкодження міокарду, серця і кровоносних судин під час операції [6, 7].

Рівняння теплопровідності в системі MSC Sinda. Для знаходження температурного поля в системі MSC Sinda використовується диференціальне рівняння теплопровідності, отримане на основі узагальненого рівняння теплопровідності [8, 9]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(\vec{q}) + q_v, \quad (2)$$

де C_p – питома теплоємність міокарда, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$, ρ – щільність тканин міокарда, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\vec{q} = \vec{q}_c + \vec{q}_R$ – швидкість зміни температури в одиниці об'єму міокарда, q_R – щільність теплового потоку за рахунок тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, q_v – щільність розподілу в міокарді структури коронарних судин.

Якщо величина коефіцієнта теплопровідності є постійною, тоді теплопередача в міокарді визначається у вигляді:

$$\text{div}(\vec{q}_c) = -\lambda_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

де x, y, z – просторові координати, λ_p – коефіцієнт теплопровідності міокарда, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$.

© В. В. Шликов. 2017

В окремому випадку, для ділянок міокарда, що збіднені коронарними судинами, внутрішні джерела тепла в міокарді можуть бути відсутніми, що означає $q_v = 0$.

При цьому, для різних ступенів неоднорідності температурного поля, вектор швидкості потоку повинен задовольняти закону збереження маси отриманого тепла, або рівнянню нерозривності, яке має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (4)$$

де \vec{u} – вектор швидкості теплового потоку, $\frac{M}{c}$.

Таким чином, узагальнене диференціальне рівняння теплопровідності для розрахунку конвекційного потоку в міокарді має вид:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \frac{\partial T}{\partial t}) = -\text{div}(\vec{q}_c) - \text{div}(\vec{q}_R), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

У тензорній формі в декартовій системі координат рівняння будуть виглядати відповідним чином:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho S_p \left(\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(uT)}{\partial y} + \frac{\partial(uT)}{\partial z} \right) = -\lambda_p \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \alpha(T - T_0), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(uT)}{\partial y} + \frac{\partial(uT)}{\partial z} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

де $\alpha = \frac{\lambda_p}{l} N_u$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні міокарда, l – товщина стінки міокарда, m , N_u – критерій Нуссельта, який характеризує процеси теплопереносу на границі між міокардом і коронарними судинами.

Коефіцієнт тепловіддачі характеризує інтенсивність конвекційного теплообміну між міокардом і кров'ю, що рухається в коронарних судинах, за рахунок переносу теплоти між міокардом і коронарними судинами.

Для ламінарного руху крові в системі штучного кровообігу критерій Нуссельта можна представити у вигляді рівняння:

$$N_u = 0,15 R_e^{0,33} \cdot P^{0,43} \cdot G_l^{0,1} \cdot \left[\frac{P_r}{P_{r,st}} \right]^{0,5} \cdot E, \quad (7)$$

де $R_e = \frac{v_{liq} \cdot l \cdot \rho_{liq}}{\mu_{liq}}$ – критерій Рейнольдса, який характеризує співвідношення сил інерції та в'язкого тертя потоку,

$$P_r = \frac{C_{liq} \cdot \mu_{liq}}{\lambda_p} \text{ – критерій Прандтля, який характеризує фізико-хімічні властивості теплоносія – крові,}$$

$$G_r = \frac{l^3 g \beta_{liq} \Delta T}{V_{liq}} \text{ – критерій Грасгофа, який характеризує рух крові в системі у вільному режимі,}$$

$\Delta T = T_{heart} - T_{liq}$ – температурний напір між стінкою міокарда й кров'ю в коронарних судинах серця,

λ_{pc} – теплопровідність стінки міокард-коронарні

судини, $\frac{Bm}{m \cdot K}$, $v_{liq} = \frac{\mu_{liq}}{\rho_{liq}}$ – кінематичний коефіцієнт

в'язкості крові, $\frac{M^2}{c}$, ρ_{liq} – щільність крові, $\frac{kg}{m^3}$, c_{liq} –

питома теплоємність крові, $\frac{Дж}{kg \cdot K}$, β_{liq} – коефіцієнт

температурного розширення теплоносія, $\frac{1}{K}$, v_{liq} –

швидкість руху крові, $\frac{M}{c}$, E_l – табличний коефіцієнт,

який залежить від значення критерію Рейнольдса, g – прискорення вільного падіння, $\frac{M}{c^2}$.

Температурний напір $\Delta T = T_{heart} - T_{liq}$ між стінкою міокарда і кров'ю в коронарних судинах серця можна визначити за допомогою застосування методів термографічного вимірювання температури на поверхні міокарда в умовах штучного кровообігу, що дозволяють контролювати градієнт температури між тканинами тіла і серця з точністю не менше 0,5 °C.

Теплова 3D-модель для міокарду та коронарних судин серця. Для визначення довжини, діаметру і контурів коронарних артерій, ступеню звуження просвіту коронарних артерій та локалізації ішемічного пошкодження, необхідно більш детальне уявлення про термодинамічні процеси які відбуваються у міокарді та коронарних судинах серця. Для дослідження теплових процесів у серці в умовах штучного кровообігу розроблено 3D-модель теплового обміну, яка містить об'єкти – м'яз міокарду і коронарні судини, що реалізовані в системі MSC Patran із вбудованою у модель тепловою RC – мережею (TNM – Thermal Network Method) [8]. Теплова 3D-модель описується системою рівнянь теплопровідності, що представляються у вигляді сотово-центрованих вузлів і опорів між цими вузлами з використанням методу кінцевих різниць [9].

При побудові геометричної 3D-моделі шлуночків серця за допомогою вузлів теплової мережі (Nodes) був забезпечений термоконтакт між тривимірними тілами – поверхнею міокарда (Surface), тілом коронарних артерій (Solid), рідиною для охолодження серця (рис. 1, а). Розв'язок рівняння теплопровідності та вільної конвекції тепла у вузлах вбудованої RC – мережі для процесу гіпертермії серця в умовах штучного кровообігу представлено в системі MSC Sinda (рис. 1, б).

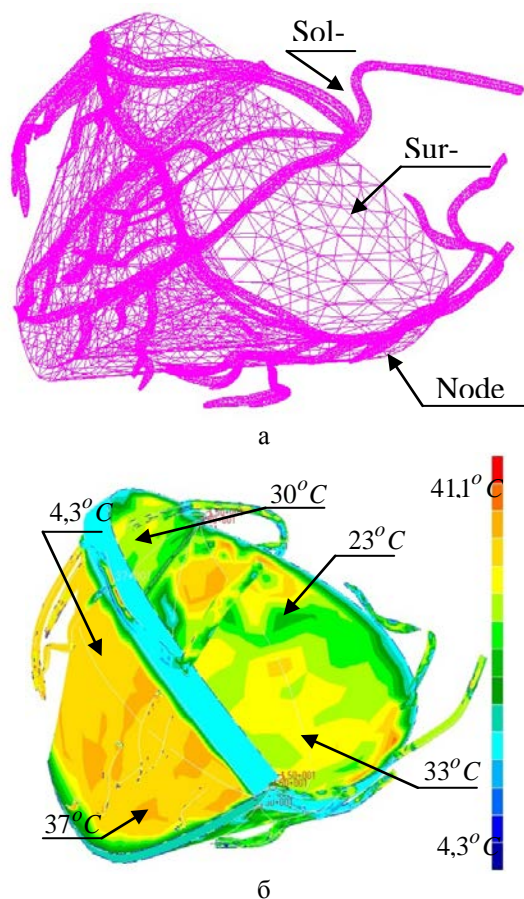


Рис. 1 – Розподіл температур у системі MSC Sinda на поверхні міокарда: а – модель у системі MSC Patran для ділянки міокарда, коронарних судин і рідким середовищем із вбудованою у модель тепловою RC- мережею; б – розрахунок розподілу температур у системі MSC Sinda на поверхні міокарда при зігріванні серця в умовах штучного кровообігу

Для представленої 3D – моделі розподіл температур у шарі при зігріванні серця показує, що різниця температур на зовнішній поверхні шару міокарда становить величину $\Delta T_1 \approx 37 - 35 = 2,0^\circ\text{C}$ і менше. Розв'язок рівняння теплопровідності та вільної конвекції для внутрішньої поверхні міокарда дає різницю температур у міокарді, яка досягає значення $\Delta T_2 \approx 30 - 23 = 7,0^\circ\text{C}$ в шарі міокарда з нормальною щільністю судин, і значення $\Delta T_3 \approx 33 - 23 = 10,0^\circ\text{C}$ в шарі зі зменшеною щільністю судин.

Для дослідження процесу гіпотермії серця в умовах штучного кровообігу в системі MSC Sinda виконано розв'язок рівняння теплопровідності та вільної конвекції тепла у вузлах вбудованої RC – мережі без використання додаткового охолодження (рис. 2, а) і з використанням льоду з температурою $T_0 \approx 0,0^\circ\text{C}$ (рис. 2, б) для додаткового охолодження міокарду і крові в судинах.

При охолодженні серця (рис. 2, а) розрахунок розподілу температур у системі MSC Sinda у шарі міокарда дає різницю температур $\Delta T_4 \approx 34 - 29 = 5,0^\circ\text{C}$ на зовнішній поверхні міокарда і різницю температур на внутрішній поверхні шару міокарда, яка досягає значення $\Delta T_5 \approx 26 - 21 = 5,0^\circ\text{C}$ в шарі міокарда з нормальною щільністю судин, і значення $\Delta T_6 \approx 35 - 26 = 9,0^\circ\text{C}$ в шарі зі зменшеною

щільністю судин. Використання льоду з температурою $T_0 \approx 0,0^\circ\text{C}$ (рис. 2, б) у процесі охолодження серця дає різницю температур $\Delta T_7 \approx 33 - 28 = 5,0^\circ\text{C}$ на зовнішній поверхні міокарда і різницю температур на внутрішній поверхні шару міокарда, яка досягає значення $\Delta T_8 \approx 25 - 22 = 3,0^\circ\text{C}$ в шарі міокарда з нормальною щільністю судин, і значення $\Delta T_9 \approx 33 - 26 = 7,0^\circ\text{C}$ в шарі зі зменшеною щільністю судин. Додаткове охолодження дозволяє зменшити різницю температур на зовнішній поверхні та внутрішній поверхні міокарда на величину $\Delta T_i \approx 2^\circ\text{C}$.

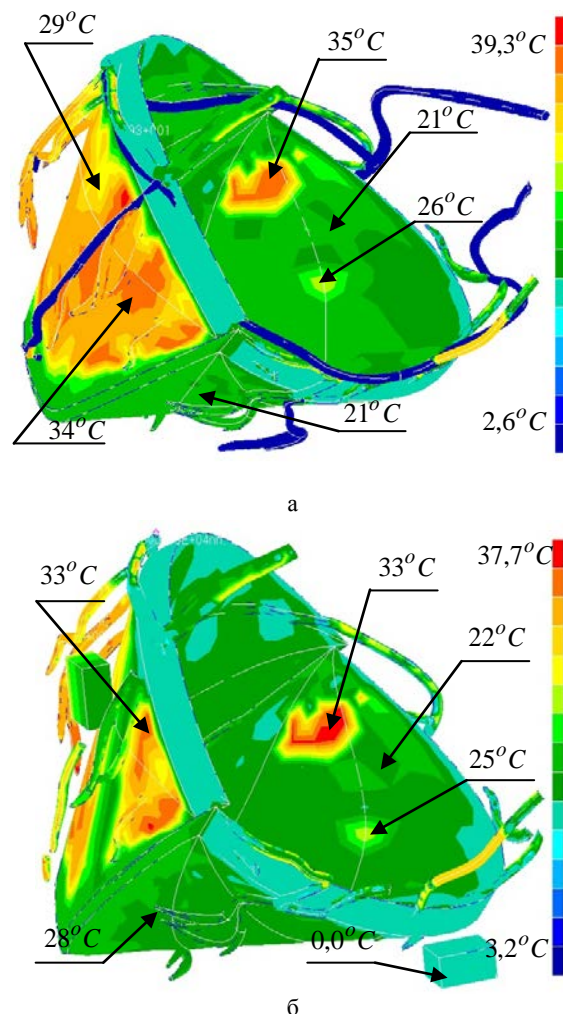


Рис. 2 – Розподіл температур у системі MSC Sinda на поверхні міокарда: а – при охолодженні серця в умовах штучного кровообігу; б – при охолодженні серця з льодом в умовах штучного кровообігу

Аналіз результатів моделювання. Таким чином, модулювання теплових процесів у міокарді підтверджує клінічні прояви хвороби серця, які вказують на невідповідність коронарного кровотоку метаболічним потребам серцевого м'яза. Зниження кровопостачання у зонах ішемії міокарда призводить до нерівномірного розподілу температур у серці, що є суттєвим у ділянках міокарда з малою щільністю коронарних судин.

Застосування льоду для додаткового охолодження в умовах штучного кровообігу дозволяє суттєво

зменшити нерівномірність розподілу температур на поверхні серця. Моделювання процесів теплообміну в системі MSC Sinda показує розподіл температур на поверхні міокарда, а також на границі, яка розділяє міокард і коронарні судини. Результати моделювання визначають різницю температур на границі, яка розділяє міокард і коронарні судини не більш $0,5^{\circ}\text{C}$ для ділянок міокарда з нормальною щільністю розподілу коронарних судин, і більш $1,0^{\circ}\text{C}$ для ділянок міокарда, які мають зони ішемії.

Отримані для теплової моделі температурні залежності дозволяють оцінити ступінь коронарної обструкції й ступінь звуження коронарних артерій у шлуночках серця, що є величиною пропорційною до змін температури. Причому в зонах ішемії спостерігається значно нерівномірне зниження і підвищення температури міокарда при охолодженні та зігріванні серця, відповідно.

Висновки. Використання теплової 3D-моделі міокарда і коронарних судин серця дає додаткову інформацію про термодинамічні процеси які відбуваються у міокарді в умовах штучного кровообігу. Застосування результатів моделювання дозволяє підвищити ефективність існуючих методів безконтактного контролю температури [10], що використовуються для моніторингу коронарної обструкції у міокарді та судинах в умовах штучного кровообігу.

Перспективним є використання теплової 3D-моделі міокарда і коронарних судин для оцінки швидкості зміни температури в міокарді при гіпотермії та гіпертермії серця, що дозволить застосовувати термографічні методи для відділення контурів коронарних судин і зон ішемії. Вдосконалення теплової моделі та методів безконтактного контролю температури серця дозволить підвищити безпечність операцій на відкритому серці.

Список літератури:

1. Лагутин, А. Ю. Средства оценки состояния ЦНС у кардиохирургических больных [Текст] / А. Ю. Лагутин, В. В. Шлыков, Н. Л. Гришина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 5-3 (24). – С. 26–27.
2. Котовський, В. Й. Обґрунтування вимог до умов проведення термографічних досліджень біологічних об'єктів [Текст] / В. Й. Котовський // Вісті академії інж. наук України. – 2009. – № 2 (39). – С. 6–11.
3. Khudetsky, I. U. Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac [Text] / I. U. Khudetsky, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // The Polish Journal of Applied Sciences. – 2015. – Vol. 1, Issue 3. – P. 93–96.
4. Nicholas, A. Medical Infrared imaging [Text] / A. Nicholas, B. Diakides, D. Joseph, A. Bronzino. – CRC Press Taylor Group LLC, London, 2008. – 451 p.
5. Shlykov, V. Application of Model of Heat Exchange for Miocardium Provided Stationary Convection Laminar Flow [Text] / V. Shlykov, V. Danilova, V. Maksymenko, M. Sychyk // Journal of Cardiology & Current Research. – 2017. – Vol. 10, Issue 1. – Available at: <http://medcraveonline.com/JCCR/JCCR-10-00350.pdf>
6. Данилова, В. А. Застосування теплових вимірювань в діагностиці судинних патологій [Текст] / В. А. Данилова, В. В. Шликов // Електроніка і зв'язь. – 2014. – Т. 19, № 5 (82). – С. 73–75.
7. Данилова, В. А. Тепловізійне дослідження розподілу температури міокарда [Текст] / В. А. Данилова, В. В. Шликов // Наукові Вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 5. – С. 106–111.
8. Moin, P. Fundamentals of Engineering Numerical Analysis [Text] / P. Moin. – 2nd ed. – Cambridge University Press, New York, 2010. doi: 10.1017/cbo9780511781438
9. Maksymenko, V. B. The Discrete Model for the System of the Myocardium and Coronary Vessels [Text] / V. B. Maksymenko, V. A. Danilova, V. V. Shlykov // Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". – 2017. – Issue 1. – P. 54–60. doi: 10.20535/1810-0546.2017.1.90044
10. Максименко, В. Б. Отображение тепловых неоднородностей для последовательности изображений в видео термограмм [Текст] / В. Б. Максименко, В. В. Шлыков, В. А. Данилова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2017. – № 19 (1241). – С. 42–47. – Режим доступу: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/108075/108075-229239-1-PB.pdf>

Bibliography (transliterated):

1. Lagutin, A. Yu., Shlykov, V. V., Grishina, N. L. (2014). Means of assessing the condition of the central nervous system in cardiac surgery patients. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 5-3 (24), 26–27.
2. Kotovskiy, V. Y. (2009). Substantiation of requirements for conditions of conducting of thermographic researches of biological objects. *Visti akademiyi inzh. nauk Ukrainy*, 2 (39), 6–11.
3. Khudetsky, I. U., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2015). Use of Thermal Imaging for Control of the Process Hypothermia Cardiac. *The Polish Journal of Applied Sciences*, 1 (3), 93–96.
4. Nicholas, A., Diakides, B., Joseph, D., Bronzino, A. (2008). *Medical Infrared imaging*. CRC Press Taylor Group LLC, London, 451.
5. Shlykov, V., Danilova, V., Maksymenko, V., Sychyk, M. (2017). Application of Model of Heat Exchange for Miocardium Provided Stationary Convection Laminar Flow. *Journal of Cardiology & Current Research*, 10 (1). Available at: <http://medcraveonline.com/JCCR/JCCR-10-00350.pdf>
6. Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2014). The use of thermal imaging in the diagnosis of vascular lesions. *Elektronika y svyaz'*, 19 (5 (82)), 73–75.
7. Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2014). Thermovisional study of the distribution of myocardium temperature. *Naukovi Visti NTUU «KPI»*, 5, 106–111.
8. Moin, P. (2010). *Fundamentals of Engineering Numerical Analysis*. Cambridge University Press, New York. doi: 10.1017/cbo9780511781438
9. Maksymenko, V. B., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2017). The Discrete Model for the System of the Myocardium and Coronary Vessels. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 1, 54–60. doi: 10.20535/1810-0546.2017.1.90044
10. Maksymenko, V. B., Danilova, V. A., Shlykov, V. V. (2017). Displays thermal inhomogeneities for a sequence of images in video thermograms. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI"* Ser.: Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta komplekxy, 19 (1241), 42–47. Available at: <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/108075/108075-229239-1-PB.pdf>

Поступила (received) 14.12.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

3D-модель теплового обміну в міокарді та коронарних судинах серця/ Шликов В. В. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266). – P.65–69. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

3D-модель теплового обмена в миокарде и коронарных сосудах сердца/ Шлыков В. В. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.65–69. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

3D-model of heat exchange in the myocardium and coronary vessels of the heart/ Shlykov V. //Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – № 44 (1266).– P.65–69. – Bibliogr.:10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шлыков Владислав Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії ФБМІ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056; e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Шлыков Владислав Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинской инженерии ФБМИ, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, Украина, 03056, e-mail: v.shlykov@kpi.ua.

Shlykov Vladyslav – PhD, associate Professor of Biomedical Engineering, Department of BME, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine, 03056,